

# Additive Fertigung von Glas: Simulation und Messung von Temperaturen in der Prozesszone

*T. Grabe<sup>1</sup>, K. Rettschlag<sup>1,2</sup>, X. Wang<sup>1</sup>, S. Wang<sup>1</sup>, A. Ziebehl<sup>1</sup>, P.-P. Ley<sup>1</sup>, R. Lachmayer<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Institut für Produktentwicklung und Gerätebau, Leibniz Universität Hannover*

*<sup>2</sup>Laser Zentrum Hannover e.V.*

*grabe@ipeg.uni-hannover.de*

---

## Abstract

In weitreichenden Einsatzgebieten der Hochleistungslasertechnik werden Quarzglasfasern aufgrund ihrer hohen optischen Leitfähigkeit und Temperaturbeständigkeit eingesetzt. Die additive Fertigung von Quarzglasfasern auf Basis eines laserbasierten Faserextrusionsverfahren ermöglicht den Einsatz von neuen Materialien und die Erweiterung der Anwendungsbereiche von additiv gefertigten optischen Komponenten.

Beim Laser Glass Deposition-Prozess (LGD) werden mit einem CO<sub>2</sub>-Laser (10,6 µm) lokal Temperaturen von über 2000 °C in das Glas eingebracht. Dieses Verfahren ermöglicht die additive Fertigung von Glas durch das Anschmelzen und anschließendes schichtweises Ablegen von Fasern. Da die Forschung und Entwicklung des LGD-Prozesses primär auf experimentellen Laborarbeiten aufbaut, sind die Temperaturfelder, die während des Herstellungsprozesses im Glas entstehen, weitgehend unbekannt. Die lokalen Verarbeitungstemperaturen und Temperaturgradienten haben jedoch großen Einfluss auf die Fertigungsqualität und die optomechanischen Eigenschaften der Glaskomponenten.

Im Rahmen dieses Beitrages wird ein Simulationsmodell zur Beschreibung der thermischen Vorgänge in einer Glasfaser und dem Substrat während des Fertigungsprozesses erstellt und mit experimentellen Daten verglichen. Ziel ist die Vorhersage der lokal auftretenden Prozesstemperaturen im Glas, die während des Prozesses entstehen. Basierend auf dem Simulationsmodell werden Fertigungsparameter wie die Leistung des Lasers und die Materialzufuhr rechnerisch evaluiert.

---

## 1 Einleitung und Zielsetzung

Der Einsatz additiver Fertigungsverfahren zur Herstellung von transparenten optischen Bauteilen und Systemkomponenten ist in der Forschung und Entwicklung von zunehmender Bedeutung [2,3]. Bei der additiven Fertigung werden die optischen Komponenten, analog zu additiv gefertigten Strukturbauteilen, schichtweise aus dem Fertigungsmaterial hergestellt [4,27]. Zu den häufig eingesetzten und kommerziell verfügbaren Verfahren für den 3D-Druck transparenter Kunststoffe zählen das Fused Deposition Modeling (FDM), die Stereolithographie (SLA), das Multi-Jet-Modeling (MJM), und die Zwei-Photonen Polymerisation (2PP) [28]. Auf Basis dieser Verfahren wurden am Institut für Produktentwicklung und Gerätebau bereits erfolgreich optische Komponenten für die Anwendung in der Raman Spektroskopie gefertigt und eingesetzt [5]. Jedoch sind die chemische und thermische Beständigkeit sowie die optischen Eigenschaften der transparenten Komponenten auf Polymerbasis zumeist stark limitiert [2,6,7].

Daher ist Quarzglas für das Erzielen von hohen Bauteilbeständigkeiten und guten optischen Eigenschaften ein vielversprechender Werkstoff [8]. Die additive Fertigung von Glas ist jedoch mit einer Vielzahl von Herausforderungen verbunden. So ist für die Glasverarbeitung eine sehr hohe Materialtemperatur von mehr als 2000 °C erforderlich [8,9]. Diese extremen Prozesstemperaturen können nach Abschluss des schichtweisen, additiven Fertigungsprozesses zu sehr hohen Spannungen im Material und folglich zur Zerstörung des Glasbauteils im Prozess führen [1,9]. Weiterhin können diese Spannungen die optischen Eigenschaften des Glases durch Brechungsindexvariationen beeinflussen [10]. Daher ist für die Entwicklung von Fertigungsprozessen für die additive Fertigung von funktionalen optischen Glasbauteilen eine Analyse der Maschinen- und Materialparameter, die einen Einfluss auf die thermischen Vorgänge während des Fertigungsprozesses haben, von großer Bedeutung.

Zur thermischen Simulation dieses Prozesses wurden bereits mehrere Ansätze entwickelt. So wurde von Luo et al., basierend auf der Massen- und Energiebilanz, die Gleichgewichtstemperatur in der Prozesszone simuliert [10]. Dieser Ansatz ermöglicht jedoch nicht die Simulation der Temperaturen und Wärmeflüsse, die im Glasfaserquerschnitt und innerhalb der Substratplatte auftreten. Aus diesem Grund ist für die numerische Abbildung lokaler Effekte der 3D-Ansatz eine Alternative. Für diesen Ansatz wurden bereits von Pohl et al. Simulationen zur Beschreibung des LGD-Prozesses durchgeführt [11]. Bei Pohl et al. werden jedoch der Glasfaserdurchmesser, die Glasfasergeometrie,

die Masse der Glasfaser und der Zuführwinkel zwischen der Glasfaser und der Substratplatte nicht berücksichtigt. Daher wird im Rahmen der Arbeit von Grabe et al. [23] ein 2D Ansatz gewählt, der diese Parameter berücksichtigt. Hierbei werden die Simulationsergebnisse mit einer einzelnen Temperaturmessung für einen Fertigungsparametersatz verglichen. Bei Grabe et al. werden jedoch Fresnel-Verluste vernachlässigt und keine experimentell gestützte Evaluation des Modellverhaltens über mehrere Fertigungsparameter durchgeführt.

Ziel dieser Arbeit ist die Erweiterung einer Simulationsumgebung zur Analyse der prozessabhängigen Temperaturparameter im LGD-Prozess [23]. Es wird Der Einfluss der Leistung des Prozesslasers und der Geschwindigkeit der Materialzufuhr auf die Temperaturentwicklung in der Prozesszone berechnet. Die Ergebnisse werden mit experimentellen Daten verglichen.

## **2 Additive Fertigung funktionaler Glaswellenleiter**

Für die Verarbeitung von Quarzglas wird im LGD-Prozess ein CO<sub>2</sub>-Laser mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 10,6\mu\text{m}$  eingesetzt. Diese Wellenlänge wird durch das Quarzglas im hohen Maße absorbiert. Ein weiterer Vorteil dieser Strahlquelle ist, dass diese, im Vergleich zu anderen Lasersystemen, kostengünstig verfügbar ist und mit hoher Effizienz eine hohe optische Leistung erreichen kann [12]. Um eine Verdampfung des Materials zu vermeiden, erfolgt eine Abschwächung der Laserleistung mit drei 50 %-Strahlteilern [1].

Basierend auf dem Laserauftragschweiß-Verfahren wird die Quarzglasfaser lateral unter einem Neigungswinkel  $\beta$  in die Bearbeitungszone geführt und durch den Laserstrahl erwärmt. Die Faser wird, wie in Abbildung 1 dargestellt, auf ein Quarzglassubstrat mit einer Stärke von zwei Millimetern abgelegt. Für den Prozess wird das Substrat auf einem axialen Tisch eines Zweiachsensystems (x, y) montiert. Über eine dritte Achse wird der Glasdruckkopf in z-Richtung bewegt. Es können sowohl kernlose Fasern als auch Fasern mit Kern in variablen Durchmessern mit diesem Verfahren verarbeitet werden [8].

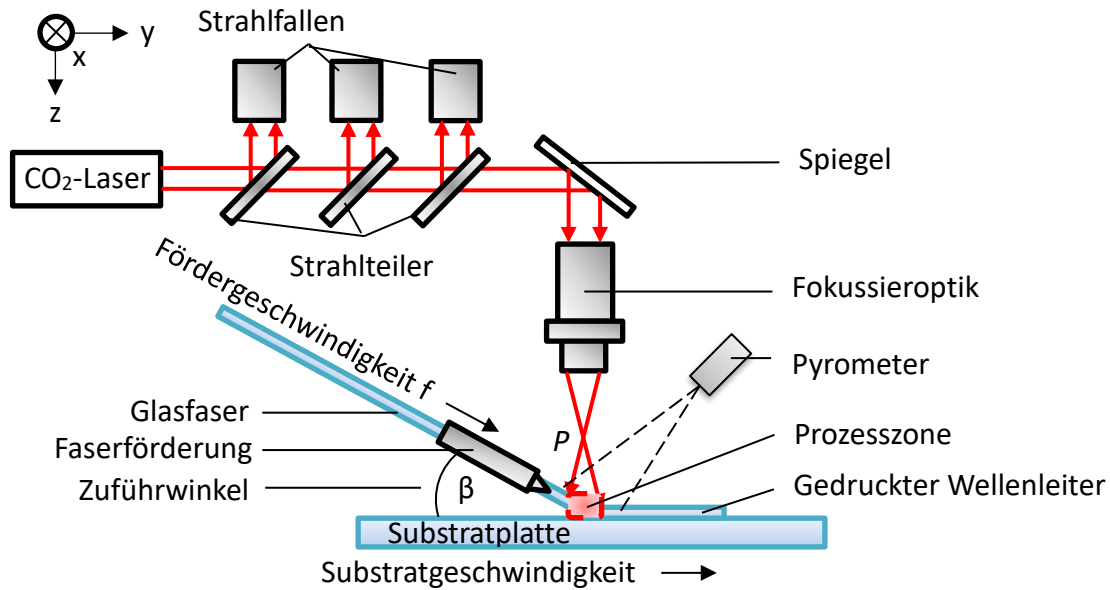


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des LGD-Prozesses nach Rettschlag et al. [1]. Eingezeichnet ist hier der schematische Verlauf der Laserstrahlung sowie alle für diesen Beitrag wesentlichen Maschinenkomponenten und Parameter.

Die im Prozess verwendete, kernlose Quarzglasfaser ist mit einer Polymerbeschichtung der Stärke  $50\mu\text{m}$  ummantelt. Aufgrund der hohen Laserleistung wird die Polymerbeschichtung vollständig verbrannt, bevor die Faser in die Prozesszone geführt wird [11]. Das Erwärmen durch den Laser und anschließendes Abkühlen des Quarzglases führen zur temporären und lokalen Veränderung des Materialvolumens. Hieraus resultieren hohe Materialspannungen im ausgekühlten Glaskörper [1].

Bei einer Länge von 50 mm konnte bei einem im LGD-Prozess gefertigten, geraden Wellenleiter eine optische Transmission von 82–86 % erreicht werden [1]. Ein konventionell gefertigter Wellenleiter dieser Faser liegt im Vergleich bei 91 % Transmission. Sowohl die optischen Leistungen als auch die Fertigungsqualität dieser Wellenleiter sind von den thermischen Vorgängen in der Prozesszone abhängig. Daher werden diese nachfolgend betrachtet.

### 3 Thermische Simulation

Für die Evaluierung der thermischen Vorgänge, die während des Fertigungsprozesses auftreten, wird zunächst der Einfluss des temperaturabhängigen Absorptionsverhaltens von Quarzglas betrachtet. Der Absorptionskoeffizient steigt näherungsweise linear von  $\alpha_{\text{SiO}_2} (T=25^\circ\text{C}) = 24,5 \frac{1}{\text{mm}}$  auf einen Wert von  $\alpha_{\text{SiO}_2} (T=1800^\circ\text{C}) = 237,4 \frac{1}{\text{mm}}$  an [13] und wird mit Gleichung (1) linear approximiert [23].

$$\alpha_{\text{SiO}_2}(T) = 0,1198 \cdot T + 21,597 \quad (1)$$

Mit dem Lambert-Beerschen Gesetz ist die Laserenergie  $E(z,T)$  im Quarzglas in Abhängigkeit der Absorptionstiefe  $z$ , der an der Materialoberfläche auftreffenden Energie  $E_0$  und der Materialtemperatur  $T$  nach Gleichung (2) zu beschreiben [14]. Nach Abitan et al. wird unter Vernachlässigung von stimulierter und spontaner Emission angenommen, dass die im Material absorbierte Laserenergie vollständig in Wärme  $Q(z,T)$  umgewandelt wird [14]. Hierauf basierend wird die in Wärme umgewandelte Energie  $\Delta Q(z,T)$  in einem beliebigen Absorptionstiefenintervall von  $z_1$  bis  $z_2$  bei einer definierten Materialtemperatur nach Gleichung (3) berechnet [22].

$$E(z, T) = E_0 \cdot \alpha(T) \cdot e^{-\alpha(T) \cdot z} \quad (2)$$

$$\Delta Q(z, T) = \Delta E(z, T) = \int_{z_1}^{z_2} E_0 \cdot \alpha(T) e^{-\alpha(T) \cdot z} dz \quad (3)$$

Weitere im Rahmen dieser Arbeit berücksichtigte, temperaturabhängige Kennwerte von Quarzglas sind der effektive Wärmeleitkoeffizient  $k_{\text{eff}}$  [12], die spezifische Wärmekapazität  $c_p$  [13] und die Dichte  $\rho(T)$  [16]. Der temperaturabhängige Wärmeleitkoeffizient wird hier nach Luo et al. [10] und Hildebrand et al. [15] aus einem Materialwert für die Wärmeleitung und einem Transmissionswert der Infrarotstrahlung bei hohen Temperaturen ( $>750^\circ\text{C}$ ) gebildet.

#### 4. Modellansatz

Im Rahmen dieser Arbeit wird, aufbauend auf dem Modell von Luo et al. [10] und Pohl et al. [11], ein 2D-Ansatz gewählt. Bei der geometrischen Modellierung werden Glasfaser und Substratplatte im Querschnitt betrachtet und in vier Bereiche eingeteilt (Abbildung 2). Im Bereich 1 wird die Glasfaser, die direkt von der Laserleistung beeinflusst wird, berechnet. Bereich 2 umfasst das Segment der Substratplatte, das ebenfalls direkt durch den Laser beleuchtet wird. Bereich 3 beschreibt den Bereich der Substratplatte, der außerhalb des Laserradius liegt und an der Oberfläche mit einer Laserintensität, die

weniger als 0,1 % der maximalen Intensität beträgt, beleuchtet wird. Der Bereich 4 ist der Teil der Substratplatte, der im Schatten der Glasfaser liegt.

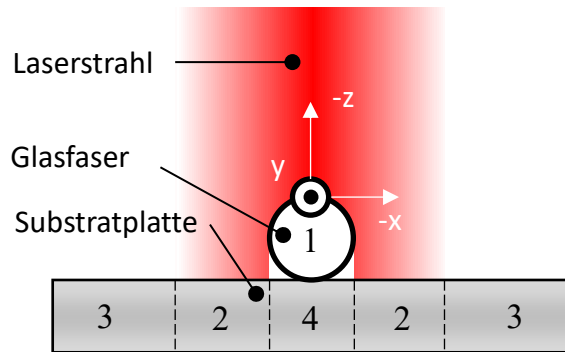


Abbildung 2: Querschnitt durch Glasfaser und Substratplatte. Einteilung in vier Teilbereiche: 1: Direkte Lasereinstrahlung in Glasfaser, 2. Direkte Lasereinstrahlung auf Substratplatte, 3. Keine Lasereinstrahlung, 4. Substratplatte im Schatten der Glasfaser.

Angenommen wird ein idealer Gauß-Laser mit dem Gauß-Radius  $\omega$  und der Gesamtleistung  $P$ . Die Laserintensität  $I(x, z, T)$  in der Absorptionstiefe  $z$  zum Zeitpunkt  $t$  des maximalen Energieeintrags für die Bereiche 1 und 2 wird nach Gleichung (4) und für den Bereich 3 nach Gleichung (5) berechnet. Nach Gleichung (3) wird ein Großteil der Laserenergie nahe der Glasfaseroberfläche absorbiert. Folglich wird für den Bereich 4 die Lichtbrechung im Glas vernachlässigt. Auf Basis dieser Annahmen kann die Laserintensität unter der Glasfaser mit dem Durchmesser  $D_f$  nach Gleichung (6) näherungsweise bestimmt werden [22].

$$I(x, z, T)_{1,2} = \frac{2\alpha(T)P}{\pi\omega^2} e^{-2\frac{x^2}{\omega^2} - \alpha(T)(z-z_0)} \quad (4)$$

$$I(x, z, T)_3 = 0 \quad (5)$$

$$I(x, z, T)_4 = \frac{2\alpha(T)P}{\pi\omega^2} e^{-2\frac{x^2}{\omega^2} - \alpha(T)(2\sqrt{\frac{D_f^2}{4} - x^2} + z - D_f)} \quad (6)$$

Die Unterseite der Substratplatte liegt auf dem Verfahrtschisch aus Aluminium auf und ist mit diesem thermisch verbunden. An der Glasfaseroberfläche und der Oberfläche der Substratplatte wird durch Konvektion und Wärmestrahlung Wärmeleistung an die Umgebung abgegeben [20,21].

Zur Berücksichtigung der dritten Raumdimension wird angenommen, dass der in Abbildung 2 dargestellte Querschnitt die Prozesszone in Abhängigkeit von der Simulationszeit  $t$  entlang der  $y$ -Achse mit der Vorschubgeschwindigkeit  $f$  durchläuft. Durch

diese Annahme können die Einflüsse von Gauß-Radius  $\omega$ , Winkel der Glasfaserzufuhr  $\beta$  und Filament-Vorschubgeschwindigkeit  $f$  analysiert werden. Der hierfür eingeführte Zeitkoeffizient  $\tau(t)$  wird mit Gleichung (7) berechnet und für jeden Zeitschritt  $t$  mit den Gleichungen (4) – (6) multipliziert. Hierbei ist Faktor  $a$  der Schwellwert, ab dem  $\tau(t) \geq 0$  ist [22].

$$\tau(t) = e^{-2 \frac{(f \cdot t \cos(\beta) - \frac{\sqrt{-0.5 \cdot \log(a) \cdot \omega^2}}{\cos(40^\circ - \beta)})^2}{\omega^2}} \quad \text{mit } \beta = 0^\circ \text{ für } t > \frac{\sqrt{-0.5 \cdot \log(a) \cdot \omega^2}}{f \cdot \cos(40^\circ)} \quad (7)$$

Weiterhin werden, erweiternd zu Grabe et al. [23], Fresnelreflektionen, die den Energieeintrag in das Glas vermindern, berücksichtigt [24,25]. Fresnelreflektionen treten durch Reflektionen auf der Oberfläche der Glasfaser und der Substratplatte auf. Eine Berechnung dieser Fresnelreflektionen erfolgt auf Basis des Zuführwinkels und der Geometrie des Filaments.

*Tabelle 1: Parameter für die Simulation.*

<i>Parameter</i>	<i>Variable</i>	<i>Wert</i>	<i>Einheit</i>
<i>Laserleistung in Prozesszone</i>	$P$	67,5	W
<i>Gauß-Radius auf Substratoberfläche</i>	$\omega$	2,1	mm
<i>Vorschubgeschwindigkeit</i>	$f$	1,5	$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$
<i>Zuführwinkel</i>	$\beta$	40	°
<i>Glasfaserdurchmesser</i>	$d$	0,4	mm
<i>Initiale Temperatur der Substratplatte</i>	$T_s$	25	°C
<i>Umgebungstemperatur</i>	$T_\infty$	25	°C

Die Simulation wird mit den in Tabelle 1 aufgelisteten Parametern auf Basis eines 2D Finite-Element-Netzes mit 22335 Knoten in COMSOL-Multiphysics 5.5 durchgeführt. Die Ergebnisse für die zeitabhängigen Temperaturen der Oberfläche (G1), der Unterseite der Glasfaser (G2) sowie unter der Oberfläche der Substratplatte (S1) sind im Diagramm der Abbildung 3 dargestellt. In der Simulation wird eine inhomogene Erwärmung über der Querschnittsfläche der Glasfaser berechnet. Folglich bildet sich hier ein Temperaturgradient aus (siehe Abbildung 3). Die obenliegende Fläche der Glasfaser erreicht in der Simulation im Maximum eine Temperatur von 2427 °C, während der gegenüberliegende Punkt an der Unterseite eine geringere Temperatur von maximal 2330 °C erreicht. Deutlich niedrigere Temperaturen von maximal 1480 °C werden unterhalb der Glasfaser auf der Substratplatte berechnet.

Im Kontaktbereich zwischen Glasfaser und Substratplatte findet durch das Verschmelzen der beiden Komponenten eine schnelle Annäherung der Temperaturen entlang der Kontaktfläche statt. Anschließend kühlt das Glas an sämtlichen Messpunkten stetig ab. Hierbei ist der Temperaturgradient bei der Abkühlung der Substratplatte geringer als der in der Glasfaser.

Zur Überprüfung der Simulationsergebnisse wird eine Temperaturmessung mit einem Pyrometer durchgeführt. Mit diesem Pyrometer kann die mittlere Temperatur in einem Messbereich von  $d_M = 1,5$  mm Durchmesser auf der Substratplatte erfasst werden. Der Mittelpunkt des Messbereiches ist im Maximum der Laserintensität in der Prozesszone

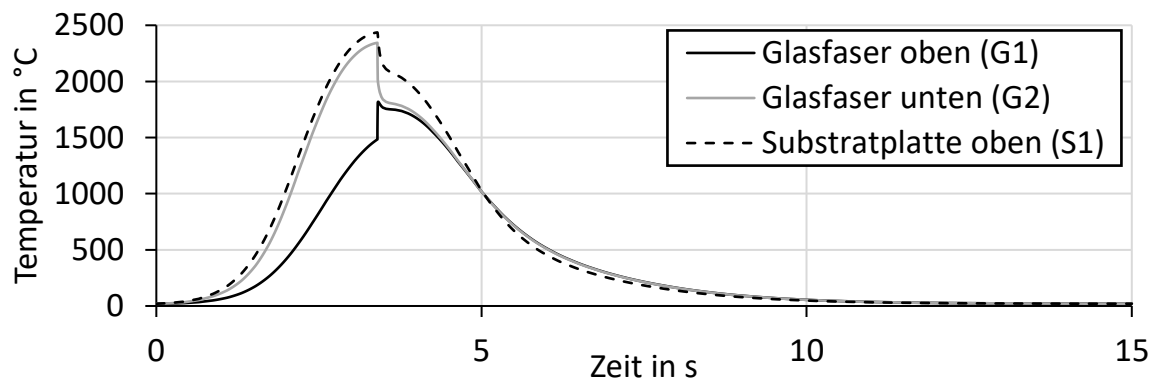


Abbildung 3: Simulierte Temperaturen in der Glasfaser und an der Oberfläche der Substratplatte bei Durchschreiten des Laserstrahls.

lokalisiert. Abweichend zur Simulation wird bei dieser Messung die mittlere Temperatur im Messbereich, und nicht die Temperatur an einem Querschnitt der Glasfaser, die durch die Prozesszone durchgeführt wird, gemessen. Somit wird erwartet, dass die hier



gemessenen Temperaturen durch die Emissions- und Transmissionseigenschaften des Glases sowie durch dessen Verdampfung beeinflusst werden können.

Aus den Messdaten geht hervor, dass das Quarzglassubstrat nach Einschalten des Lasers erwärmt wird und sich anschließend nach einigen Sekunden eine Gleichgewichtstemperatur im Messbereich einstellt. Diese Temperatur ist bis zum Abschluss des Aufschweißprozesses nahezu gleichbleibend. Daher wird für die Analyse nachfolgend die über den Messzeitraum gemittelte Gleichgewichtstemperatur im Pyrometermessbereich herangezogen.

Für den Vergleich mit den Messdaten des Pyrometers werden die Simulationsergebnisse durch die gemittelte Temperatur  $T_M$  beschrieben. Die Temperaturen der FEM-Knoten werden an sieben Analysepunkten, die sich in dem Messbereich des Pyrometers befinden ausgelesen, um die gemittelte Temperatur  $T_M$  zu berechnen. Der zeitliche Abstand zwischen den Messschritten  $\Delta t_M$  wird nach Gleichung (8) bestimmt.

$$\Delta t_M = \frac{1}{8} \cdot \frac{d_M}{f} \quad (8)$$

Anschließend wird der arithmetische Mittelwert-Knoten gebildet. Auf dieser Basis kann der Einfluss von Prozessparametern auf die mittlere Temperatur evaluiert werden.

Die Werte von Pyrometermessung und mittlerer Temperatur sind in einem Wertebereich von  $1,3 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \leq f \leq 2,0 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$  und  $56,3 \text{ W} \leq P \leq 78,8 \text{ W}$  in Abbildung 4 dargestellt.

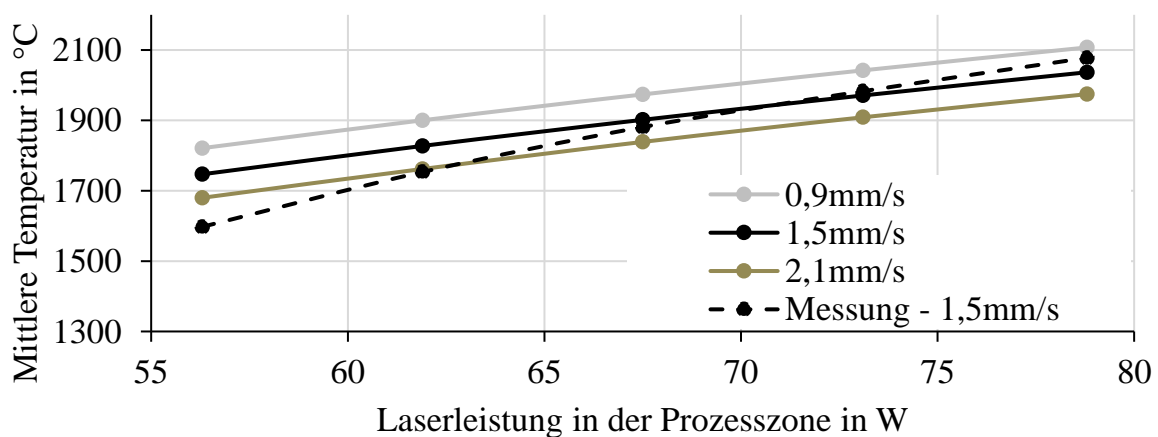


Abbildung 4: Simulierte, mittlere Temperaturen für verschiedene Laserleistungen in der Prozesszone und Vorschubgeschwindigkeiten im Vergleich mit den Messergebnissen.

Mit zunehmender Laserleistung steigt die simulierte, mittlere Temperatur in der Prozesszone. Diese Temperaturentwicklung ist nichtlinear, da die Wärmeverluste durch die

Wärmestrahlung exponentiell ansteigen. So beträgt bei  $P = 53,3 \text{ W}$  Laserleistung und  $f = 1,5 \text{ mm/s}$  die mittlere Temperatur  $T_{M,S} = 1746 \text{ °C}$  und bei  $P = 78,8 \text{ W}$   $T_{M,S} = 2078 \text{ °C}$ . Weiterhin wird bei gleichbleibender Laserleistung und einer verringerten Fördergeschwindigkeit eine höhere Temperatur berechnet.

## **5 Kritische Diskussion**

Die hier vorgestellte Simulationsumgebung basiert auf einem 2D-Ansatz und ermöglicht die Analyse der orts- und zeitaufgelösten Temperaturen, die während des LGD-Prozesses auftreten.

In der Simulation wird vereinfachend angenommen, dass die Glasfaser zum Zeitpunkt des Kontaktes mit der Substratplatte bereits aufgeschmolzen ist und somit ein sehr schneller Wärmeaustausch zwischen Glasfaser und Substrat nach dem Kontakt erfolgt. Weiterhin sind die Form der Faserquerschnittsfläche und deren Kontaktwinkel zur Substratplatte stark von der Temperatur in der Prozesszone abhängig, da diese die Oberflächenspannung und die Viskosität des Glases stark beeinflussen [18,19]. Dieser Einfluss wird nicht in der Simulation berücksichtigt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Konvektionskoeffizient für den Wärmeübergang von der Glasfaseroberfläche an die Umgebungsluft mit  $\alpha_K = 300 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$  abgeschätzt. Dieser Faktor wird in der Praxis durch die Verwendung von einer Prozessgasströmung sowie durch die Bauteil- und Bauraumgeometrie bestimmt und ist mit großer Unsicherheit behaftet.

Mit der vorgestellten Simulation wird, aufbauend auf der eindimensionalen Analyse von Luo et al. [10,17], die geometrisch mehrdimensionale Betrachtung der Prozesszone im LGD-Prozess berechnet. Hier wird das thermische Verhalten des Glasmaterials innerhalb der Prozesszone numerisch aufgelöst und ermöglicht somit insbesondere im Hinblick auf die lokale thermische Prozessanalyse die simulationsgestützte Prozessentwicklung. Erweiternd zu Luo et al. [10], Pohl et al. [11] und Grabe et al. [23] wird ein Vergleich mit einer Reihe von Temperaturmessungen der Prozesszone durchgeführt.

Die in dieser Arbeit berechneten, lokalen Temperaturverteilungen in der Prozesszone werden qualitativ durch Prozessaufnahmen bestätigt [26]. Die hierbei festgestellten Abweichungen und Übereinstimmungen müssen in weiteren Arbeiten analysiert werden.

## **6 Zusammenfassung und Ausblick**

Beim Laser Glass Deposition Modeling-Prozess (LGD) wird zur additiven Fertigung von funktionalen Wellenleitern eine Quarzglasfaser mithilfe von Laserlicht ange-

schmolzen und abgelegt. Auf der Grundlage des LGD-Prozesses wird ein Simulationsmodell für die zeit- und orts aufgelöste Berechnung der Prozesstemperaturen im Quarzglas entwickelt.

Basierend auf den Ergebnissen der Simulation ist ersichtlich, dass die obenliegende Fläche der im LGD-Prozess verarbeiteten Glasfaser eine höhere Temperatur, als der gegenüberliegende Punkt an dessen Unterseite erreicht. Deutlich niedrigere Temperaturen treten auf der Substratplatte im Schatten der Glasfaser auf. Basierend auf den Ergebnissen wird deutlich, dass die lokal in der Glasfaser und im Substrat auftretenden Temperaturen nicht homogen in der Prozesszone verteilt sind. Diese Inhomogenitäten können hohe Materialspannungen im Bauteil zur Folge haben. Für die Überprüfung der Simulationsergebnisse wurde eine Pyrometermessung der Prozesszonentemperatur durchgeführt und mit dem Simulationsergebnis verglichen. Hierbei wurde der Einfluss von der Laserleistung  $P$  und der Vorschubgeschwindigkeit  $f$  auf die mittlere Temperatur im Rahmen einer Parameterstudie numerisch berechnet und mit Messergebnissen gegenübergestellt.

Über die simulative Darstellung der Temperaturverteilung kann in einem weiteren Entwicklungsschritt der Simulation durch die Implementierung einer thermomechanischen Berechnung auf die orts aufgelöste Entstehung von Spannungen im Substrat und Wellenleiter geschlossen werden. Diese Spannungen sind ausschlaggebend für den Erfolg des additiven Fertigungsprozesses und darüber hinaus beeinflussen diese die Lichtausbreitung innerhalb der Wellenleiter. Besonders für die Fertigung von Mehrschichtstrukturen und Volumenbauteilen kann durch die Erweiterung der Simulation der thermische Einfluss der Substratplatte und des Wärmeflusses quantitativ für die Prozessoptimierung berücksichtigt werden. Dies ist insbesondere für die Berechnung gezielter optischer Bauteileigenschaften in der Phase des Designs und des Pre-Prozesses von großer Bedeutung.

## **7      Anmerkung**

Diese Arbeit wurde im Rahmen des EFRE - NBank geförderten Projektes "GROTESK - Generative Fertigung optischer, thermaler und struktureller Komponenten" durch das Teilprojekt oGROTESK (ZW6-85018307) durchgeführt.



## Literatur

- [1] Rettschlag, K.; Kranert, F.; Hohnholz, A.; Wienke, A.; Suttman, O.; Neumann, J.; Kracht, D.; Lachmayer, R.: Laser deposition of fused silica coreless fibers to generate functional waveguides. In: Lasers in Manufacturing Conference 2019; 2019
- [2] Heinrich, A.; Rank, M.: 3D Printing of Optics. SPIE; 2018
- [3] Lachmayer, R.; Bode, B.; Grabe, T.; Rettschlag, K.: Integration spezifischer Effekte in Strukturbauteilen mittels Additiver Fertigungsverfahren. In: Lachmayer, R., Rettschlag, K., Kaierle, S. (eds.) Konstruktion für die Additive Fertigung 2019, pp. 1–10. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg; 2020
- [4] VDI Gesellschaft Produktion und Logistik: VDI 3405-Additive manufacturing processes, rapid manufacturing - basics, definitions, processes. In: VDI Handbuch; Deutschland Berlin; 2014
- [5] Grabe, T.; Li, Y.; Krauss, H.; Wolf, A.; Wu, J.; Yao, C.; Wang, Q.; Lachmayer, R.; Ren, W.: Freeform optics design for Raman spectroscopy. In: Soskind, Y., Busse, L.E. (eds.) Photonic Instrumentation Engineering VII. Photonic Instrumentation Engineering VII, San Francisco, United States; SPIE; 2020; DOI: 10.1117/12.2544708
- [6] Grabe, T.; Biermann, T.; Bayerl, M.; Lachmayer, R.: Anisotropic characteristics analysis of 3D-printed optics. In: DGaO-Proceedings 2020; 2020; ISSN: 1614-8436 – urn:nbn:de:0287-2020-B022-0
- [7] Biermann, T.; Grabe, T.; Ley, P.-P.; Lachmayer, R.: Potentials and challenges of additive manufacturing using highly transparent silicone materials. In: DGaO Proceedings 2020; 2020; ISSN: 1614-8436 – urn:nbn:de:0287-2020-P023-8
- [8] Von Witzendorff, P.; Pohl, L.; Suttman, O.; Heinrich, P.; Heinrich, A.; Zander, J.; Bragard, H.; Kaierle, S.: Additive manufacturing of glass: CO<sub>2</sub>-Laser glass deposition printing. Procedia CIRP; 2018; DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.109
- [9] Kranert, F.; Rettschlag, K.; Wienke, A.; Hohnholz, A.; Neumann, J.; Jäschke, P.; Kracht, D.; Lachmayer, R.: Generation of functional curved waveguides by CO<sub>2</sub>-

- laser based deposition of coreless fused silica fibers; In: SPIE Photonics Europe; 2020; DOI: 10.1117/12.2554516
- [10] Luo, J.; Gilbert, L.J.; Qu, C.; Landers, R.G.; Bristow, D.A.; Kinzel, E.C.: Additive Manufacturing of Transparent Soda-Lime Glass Using a Filament-Fed Process; In: Journal of Manufacturing Science and Engineering; 2017; DOI: 10.1115/1.4035182
- [11] Pohl, L.; Von Witzendorff, P.; Chatzizyrlis, E.; Suttman, O.; Overmeyer, L.: CO<sub>2</sub> laser welding of glass: numerical simulation and experimental study. In: Int J Adv Manuf Technol; 2017; DOI: 10.1007/s00170-016-9314-9
- [12] Doualle, T.; Gallais, L.; Cormont, P.; Hébert, D.; Combis, P.; Rullier, J.-L.: Thermomechanical simulations of CO<sub>2</sub> laser-fused silica interactions. In: Journal of Applied Physics; 2016; DOI: 10.1063/1.4944435
- [13] McLachlan, A.D.; Meyer, F.P.: Temperature dependence of the extinction coefficient of fused silica for CO<sub>2</sub> laser wavelengths. In: Applied Optics; 1987; DOI: 10.1364/AO.26.001728
- [14] Abitan, H.; Bohr, H.; Buchhave, P.: Correction to the Beer-Lambert-Bouguer law for optical absorption. In: Applied Optics; 2008; DOI: 10.1364/ao.47.005354
- [15] Hildebrand, J.; Hecht, K.; Bliedtner, J.; Müller, H.: Laser Beam Polishing of Quartz Glass Surfaces. In: Physics Procedia; 2011; DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.056
- [16] Mazurin, O. V.; Streltsina, M.V.; Shvaiko-Shvaikovskaya, T.P.: Handbook of Glass Data Silica Glass and Binary Silicate Glasses, Part A. In: Elsevier Science; 1983
- [17] Luo, J.; Gilbert, L.J.; Bristow, D.A.; Landers, R.G.; Goldstein, J.T.; Urbas, A.M.; Kinzel, E.C.: Additive manufacturing of glass for optical applications. In: Gu, B., Helvajian, H., Piqué, A. (eds.) Laser 3D Manufacturing III. SPIE LASE, San Francisco, California, United States; SPIE; 2016; DOI: 10.1117/12.2218137
- [18] Pilon, L.; Zhao G.; Viskanta R.: Three-Dimensional Flow and Thermal Structure in Glass Melting Furnaces. Part I: Effect of the Net Heat Flux Distribution. In: Glass Science and Technology, 75(3); 2002

- [19] Pilon, L.; Zhao G.; Viskanta R.: Three-Dimensional Flow and Thermal Structure in Glass Melting Furnaces. Part II: Effect of Batch and Bubbles. In: Glass Science and Technology, 75(3); 2002
- [20] Lienhard, J.H.: A heat transfer textbook, 4th edn. Dover books on engineering. In: Dover Publ, Mineola, NY; 2011
- [21] Teixeira, P.R.d.F.; Araújo, D.B.; da Cunha, L.A.B.: Study of the gaussian distribution heat source model applied to numerical thermal simulations of TIG welding processes. In: Cieng; 2014; DOI: 10.14393/19834071.2014.26140
- [22] Mixon, D.G.; Roach, W. P. (ed.): A Thermal Model of Laser Absorption. Conference on Optical Interactions with Tissue and Cells [18th]; California; 2007, DOI: 10.1117/12.700910
- [23] Grabe, T.; Rettschlag, K.; Wang, S.; Lachmayer, R.: Modellierung und Evaluation thermischer Effekte für die laserbasierte Additive Fertigung von funktionalen Glaswellenleitern. In: Lachmayer, R., Rettschlag, K., Kaierle, S. (eds.) Konstruktion für die Additive Fertigung 2020, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg; 2021 (Beitrag angenommen)
- [24] Born, M; Wolf, E: Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light, Elsevier, 2013.
- [25] Zolotarev, V.M.: Study of quartz glass by differential fourier transform IR reflection spectroscopy: Bulk and surface properties. In. Optics and Spectroscopy 107 (5), pp. 794-807, 2019, DOI: 10.1134/S0030400X09110113
- [26] Rettschlag, K.; Ley, P.-P.; Kranert, F.; Hinkelmann, M.; Kaierle, S.; Lachmayer, R.: Additiv gefertigte Glaskugellinsen für die Anwendung. In: Lachmayer, R., Rettschlag, K., Kaierle, S. (eds.) Konstruktion für die Additive Fertigung 2020, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg; 2021 (Beitrag angenommen)
- [27] Biermann, T.; Ley, P.-P.; Feldmann, J.; Lachmayer, R.: Konzepte für die Additive Fertigung optischer Elemente mit hochtransparenten Silikonwerkstoffen in Konstr. für die additive Fertigung; 2020
- [28] Heinrich, A.(eds.): 3D Printing of Optical Components. Springer International Publishing; 2021, DOI: 10.1007/978-3-030-58960-8

## **Autorenanschriften**

Tobias Grabe

Leibniz Universität Hannover

Institut für Produktentwicklung und Gerätebau

An der Universität 1, Gebäude 8143

30832 Garbsen

Telefon: 0511-762 14656

Telefax: 0511-762 4506

E-Mail: [grabe@ipeg.uni-hannover.de](mailto:grabe@ipeg.uni-hannover.de)